

火山噴煙・ガスと周辺環境の教材化

飯野直子・金柿主税*¹

Teaching materials using volcanic ejecta and its environmental impact

Naoko IINO and Chikara KANAGAKI*¹

(Received October 1, 2009)

Miyakejima volcano has been ejecting enormous amounts of volcanic gas since mid-August 2000. We discussed the continuous measurement SO₂ data at the foot of Miyakejima volcano, in conjunction with upper wind data at Hachijyojima near-by, synoptic charts, atmospheric conditions and satellite images of the distribution of vegetation. The following results are obtained. Fresh wind is the main cause of high SO₂ concentrations for each gas monitoring station. The winter monsoon wind brings high SO₂ concentrations for many hours to the stations located east of the volcano. Travelling high/low pressure systems that move eastward are characteristic of spring and autumn weather, and high SO₂ concentrations produced by strong, changeable winds were recorded at various stations as low pressure systems accompanying cold fronts passed near the island. In addition, the position of typhoon and deep low pressure system accompanying cold front, and the path of them dominantly affects the high SO₂ concentrations. The frequency of high SO₂ concentration events corresponds well to the distribution of vegetation shown in an image of TERRA/ASTER. The Ministry of Education, Culture, Sports, Science & Education have improved the course of studies from elementary school to upper secondary school in 2008 (elementary school and lower secondary school) and in 2009 (upper secondary school). In order to develop the teaching materials based on the new course of studies, we discuss the usage of Miyakejima results as teaching materials for meteorological and environmental educations.

Key words : volcanic clouds, volcaninc gas, sulfur dioxide, meteorology, wind, synoptic chart, vegetation

1. はじめに

三宅島では2000年7月8日の雄山の山頂噴火以来、活発な火山活動が続いている。同年8月10, 18, 29日の大噴火後、9月1日から全島避難が実施された。多量の火山ガス放出のため、2005年2月に避難指示が解除されるまで長期間の避難生活が続いた。避難指示解除後も東部の坪田高濃度地区と南西部の阿古高濃度地区は立ち入りが規制されてきた。火山ガスの放出量は徐々に減少してきており、2009年は2000トン/日を下回ることが多くなっている[1]。阿古高濃度地区は2009年4月に規制が解除され、居住が可能となった。坪田高濃度地区の規制は現在も続いているが、2008年から火山ガスの影響が少ない9月と10月に一時滞在事業が行われている。

三宅島島内の火山ガス環境に関する研究として、2000年12月から東京都が三宅島山麓部に設置した火山ガス固定観測局のデータを解析し、高濃度発生メカニズムや地域・季節特性を調

べてきた[2,3]。また、植物が火山ガスの影響をよく反映するという仮定のもと、地球観測衛星の植生指数画像を利用してハザードマップを作成してきた[4,5]。

平成20年と21年に小・中学校の学習指導要領と高等学校の学習指導要領が公示された。基礎的・基本的な知識・技能の確実な定着、科学的な思考力や表現力の育成、観察、体験や自然体験、科学的な体験の一層の重視、理科を学ぶことの意義や有用性を実感する機会を持たせ、科学への関心を高めることなどの改善の基本方針を受けて理科の改善がされている。具体的には、小学校では目標に「実感を伴った理解」が加わり、中学校では「活用」という視点及び「社会との関連付け」がより明瞭になり、高等学校では「探究的な学習」を重視する改善がされている。また、理科についても、環境教育の充実を図る方向で改善されている[6-8]。

そこで本研究では、今回の改定の趣旨を踏まえた教材開発を行うにあたり、三宅島島内の火山ガス環境に関する研究成果を

*¹ 熊本県甲佐町立甲佐中学校教諭/鹿児島大学教育学部研究協力員

気象の学習や環境・防災教育のための教材とすることを考えた。本稿では、まず三宅島島内の火山ガス環境について概括し、中学校理科や高等学校地学を対象とした教材化を検討する。

2. 使用データと解析方法

1) 三宅島における SO₂ の連続測定データ

東京都等による火山ガス固定観測局は2000年12月の3局体制から始まり(A1: 支庁局, A2: 空港局, A3: 阿古局), 2001年9月に3局(B1: 逢の浜局, B2: アカッコ局, B3: 伊ヶ谷局), 2002年3月に4局(C1: 三池局, C2: 村役場局, C3: 坪田局, C4: 薄木1局), 2004年4月に4局(D1: 美茂井局, D2: 御嶽神社局, D3: 薄木2局, D4: ふるさと局) 増強されて14局体制となった。各観測局の位置を図1に示す。2000年12月は13日から観測が始まったので、解析には2001年1月のデータから2007年12月までを使用した。固定観測局ではSO₂濃度の5分値と1時間値が得られているが、ここでは1時間値のみを使用した。SO₂の環境基準は1時間値が0.1ppmを超えないこととなっている。三宅島島内では非常に高濃度となることが多いため、0.1ppmに加えて、1ppmと2ppmを高濃度事象の基準とした。なお、2ppmはACGIH(米国産業衛生専門家会議)勧告の許容濃度である。

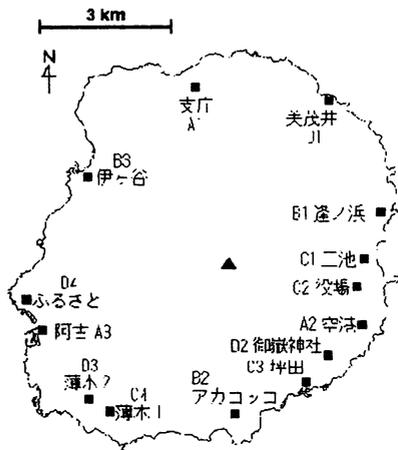


図1 三宅島島内の火山ガス固定観測局の位置。

2) 高層気象観測データ

三宅島の地表における火山ガス濃度は雄山(775m)の山頂高度付近の風に支配的な影響を受けていると考えられるが、山頂風の直接測定は行われていない。地上風は局地的な影響を受けやすいため、高層気象観測点のうち最も三宅島に近く、同じく海上孤島である八丈島(三宅島の南南東約110km, 図2)の指定気圧面925hPa(海拔高度で約830m)の高層風を三宅島上空の風として代用した。2004年2月までは八丈島における高層気象観測は3, 9, 15, 21時の6時間毎に行われており、風データはすべての時間に得られている。2004年3月以降の定期的な観測は9時と21時のみである。温度と湿度は従来どおり、9時と21時の12時間毎に観測されている。

火山噴煙・ガスの鉛直方向の運動は大気成層度の影響を受ける。三宅島島内の高濃度SO₂と噴煙の吹き降ろしとの関係を理解するために、八丈島における高層気象観測データの温度湿度観測点データを用いてフルード数を計算した。

温位は以下の式で計算する。

$$\theta(z) = T(z) \left(\frac{p_0}{p(z)} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} \quad (1)$$

ここで、 $p(z)$ は高度 z における気圧[hPa], R_d は乾燥空気気体定数[J/kg K], C_p は定圧比熱[J/kg K]である。標準気圧 p_0 は1000hPaとする。

フルード数 Fr は以下の式で計算する。

$$Fr = \frac{U}{NH} \quad (2)$$

ここで、 U は山頂付近の風速[m/s], H は三宅島の高さ814mであり、 N のプラントバイサラ振動数[rad/s]は以下の式で与えられる。

$$N = \sqrt{\frac{g}{T_0} \frac{d\theta}{dz}} \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度[m/s²], T_0 は地表面を除く最下層の気温[K], $d\theta/dz$ は最下層と山頂の間の温位勾配[K/m]である。

フルード数が1のとき、ちょうど山肌に沿って火山ガスが吹き降ろす[9]。フルード数が1を超えると山麓に火山ガスが吹き降ろされ、高濃度SO₂が発生すると予測される。

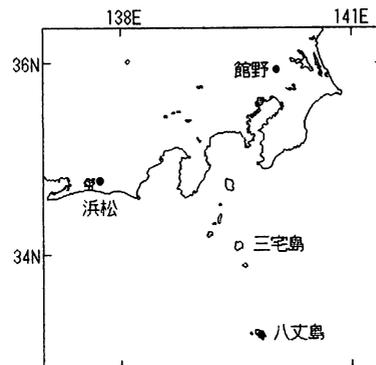


図2 三宅島と周辺の高層気象観測点(•)の位置。

3) 衛星データ

日本のJERS-1衛星は1992年に打ち上げられ、1998年10月まで運用された。JERS-1に搭載されたOPSセンサにより、地上分解能18.3×24.2mで、可視から近赤外までの4バンドでの観測が行われた。ASTERはOPSの後継として開発されたセンサであり、可視から熱赤外領域までに14バンドを有する高性能光学センサである。可視・近赤外バンドの地上分解能は15mであり、アメリカの地球観測衛星Terraに搭載されている。

植物への火山ガスの影響は、植物の活性度が高い夏季に顕著に観られると考えられるが、夏季には山頂などが雲に覆われており、雲や噴煙が島にかかっていない衛星データを得ることはできなかった。2000年の噴火前については、三宅島が雲に覆われていない画像がASTERデータにはなかったため、1994年4月3日のJERS-1/OPSのデータを用いた。噴火後については、2003年4月7日と2007年5月11日のTerra/ASTERデータを用いた。

島内の植生分布を調べるために、以下の式を用いて植生指数(NDVI)を求めた。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (4)$$

ここで、VISとNIRにはそれぞれ可視バンドと近赤外バンドを割り当てる。Terra/ASTERの場合は、それぞれバンド2と3Nを、JERS-1/OPSの場合はバンド2と3を割り当てる。

NDVI(植生指数)画像は、植物が可視光をよく吸収するのに対して近赤外域をよく反射する性質にもとづいて考案された、植物の量や活性度を調査するのに適した画像である。規格化することで地形の起伏による陰の影響や大気の影響を軽減することができる。NDVIが大きいと白く表示され、これは植物の量が多く、活性度が高いことを示す。NDVIが小さい場合は黒く表示され、これは裸地や水面を表す。

3. 三宅島島内火山ガス環境

1) 島内火山ガス環境の季節・地域特性

2001年1月から2007年12月までの全ての火山ガス固定観測局のSO₂月平均濃度を図3に示す。三宅島山麓部の火山ガス環境は以下のように要約できる。(i) 火口の東部に位置する三池局

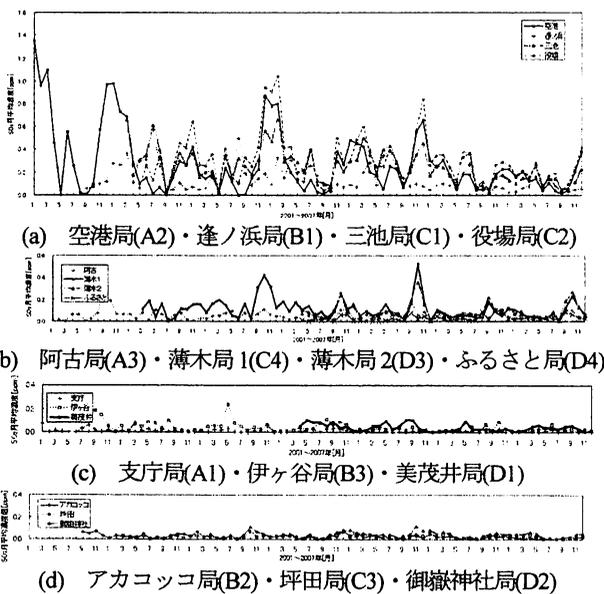
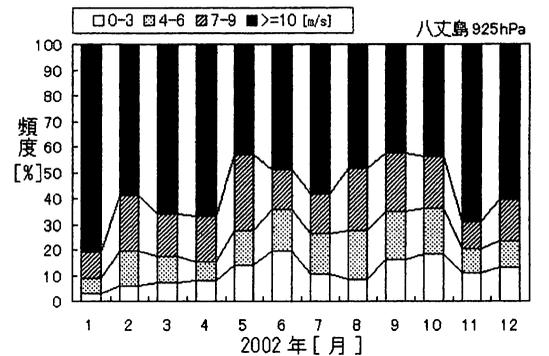


図3 2001年1月～2007年12月の火山ガス固定観測局のSO₂月平均濃度。

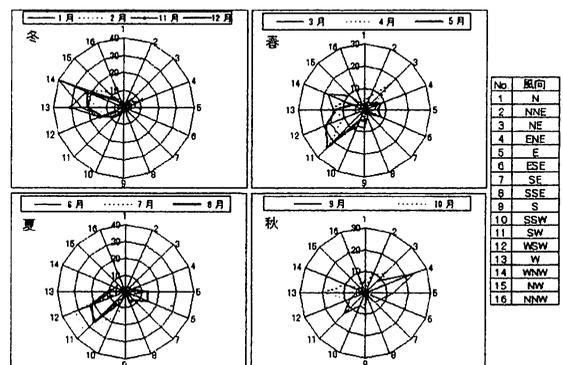
(C1)、役場局(C2)、空港局(A2)では冬季の平均濃度が非常に高い。火口東の三池局(C1)と役場局(C2)では夏季の濃度も高い。(ii) 東北東部に位置する逢ノ浜局(B1)では、夏季に平均濃度が高くなる。ただし、2001年は冬季も平均濃度が高かった。(iii) 南西部に位置する薄木1局(C4)と薄木2局(D3)では、一年を通して比較的平均濃度が高い。特に秋の平均濃度が高い。阿古局(A3)とふるさと局(D4)の平均濃度の経月変化は、薄木1局(C4)と薄木2局(D3)と類似の傾向を示すが、濃度はそれほど高くない。(iv) 北東部に位置する美茂井局(D1)では春・夏季の平均濃度が高く、秋・冬季は高くない。(v) 北に位置する支庁局(A1)、北西の伊ヶ谷局(B3)、南東部の坪田局(C3)と御嶽神社局(D2)における平均濃度は一年を通して高くない。

2) 高濃度SO₂事象と気象の関係

2002年5月から1年間の八丈島925hPa風について風速階級別の発生頻度を図4(a)に示す。風速の階級は、弱風：0-3 m/s、並風：4-6 m/s、強風：7-9 m/s、疾風：10 m/s以上の4段階に分類した。一般に太平洋高気圧が支配的な夏季には風は穏やかであると考えられるが、6～8月でも7 m/s以上の風が60～70%の頻度で記録されている。1年間で7 m/s以上が記録される割合は、内陸部に位置する館野では40.9%であるのに対して八丈島では72.3%である。八丈島は海上孤島であるため、1年を通して比較的風が強いことがわかる。



(a) 風速の階級別頻度



(b) 風向記図

図4 2002年5月から1年間の八丈島925hPa高層風。

風配図を図4(b)に示す。風向の特徴から、季節を春：3～5月、夏：6～8月、秋：9～10月、冬：11～2月に分けた。高層風データの風向は360度表記で与えられるが、ここでは16方位で示した。特徴的なのは、一年を通して北西と南東の風が吹くことはほとんどないことである。季節による風向の特徴としては、夏季は太平洋高気圧による南西風が支配的であり、冬季は西高東低の冬型の気圧配置が安定しやすいため、ほとんど北西～西よりの風が吹いている。春と秋には、移動性高気圧のため風向のばらつきが大きい。なお、2001年、2003年の高層風についても同様であった。

2002年5月から2003年4月までの1年間を解析対象として、八丈島925 hPa風データがあり、各局でSO₂濃度1時間値が1 ppm以上になる場合と0.1 ppm以上になる場合の割合について、そのときの風向と風速の平均と標準偏差を表1に示す。風向は北を0度とした時計回りに360度表記されている。例えば、270度は西風を表す。表1の1 ppm以上のデータを図5に図示する。扇の面積は各局における事象の観測割合を表し、向きは火口上空からの風向の平均、角度は±標準偏差を表す。例えば、図5(a)中の村役場局の面積は観測割合10%であることを示している。

風速については、1 ppm以上と0.1 ppm以上の場合で大きな違いはなく、平均値は8 m/s以上になっている。アカコッコ局と薄木局で、風向の平均値が1 ppm以上と0.1 ppm以上の場合でそれぞれ35度異なっているが、それ以外の局では、1 ppm以上の場合と比べて0.1 ppm以上の場合には風向の標準偏差が大きくなる傾向があるものの、その他の値や傾向には特に大きな違いは見られない。したがって、高濃度SO₂事象時の気象状況を調べるには1 ppm以上の場合について考察すれば十分である。

図3, 4と表1から島の東部が高濃度となる場合が非常に多く、西南部がこれに次いでいることがわかる。以下ではこの高濃度地域における1 ppm以上の高濃度事象発生時の気象状況について述べる。

島の東部に位置する空港局(A2)において高層風観測時のSO₂濃度に対する高層風の風向とフルード数の散布図を図6(a)に示す。縦軸のFr数は対数表示している。点線は空港局(A2)からの火口の方向を表す。1 ppm以上に注目すると、フルード数にばらつきはあるものの、空港局(A2)からの火口の方向(図中の点線)にデータ点が集まっている。1 ppm以上が観測されているときにフルード数が1以上である割合は、空港局(A2)では91%、三池局(C1)では77%、役場局(C2)で89%ある。三宅島東部の局の高濃度SO₂は強風による風下局への吹き降ろしが主因であることがわかる。また、東部の局では冬季に高濃度が長時間継続することが多いが、これは冬型の気圧配置は安定で、風のシヤーが小さく風向変化も少ないためと考えられる。表1に示したように、1 ppm以上の場合の風向の標準偏差も14～25度程度と小さい。

南西部に位置する薄木局と阿古局では、風速の標準偏差は東部の三池局(C1)役場局(C2)、空港局(A2)と同程度であるが、風向のばらつきが大きい。1 ppm以上のSO₂濃度が観測され

表1 2002年5月～2003年4月の八丈島925 hPa高層風と高濃度事象の対応。

観測局名	支庁	遠の浜	三池	村役場	空港	坪田	アカコッコ	薄木	阿古	伊ヶ谷
観測局記号	A1	B1	C1	C2	A2	G3	G4	A3	A4	B3
火口の方位 [度]	170	245	256	272	288	320	357	47	71	123
有効観測時間 [hour]	1441	1338	1248	1415	1447	1408	1453	1225	1452	1455
SO ₂ 濃度が1ppm以上の観測時間数 [hour]	2	53	88	142	82	4	4	37	13	11
SO ₂ 濃度が0.1ppm以上の割合 [%]	0.1	4.0	7.1	10.0	5.7	0.3	0.3	3.0	0.9	0.8
925hPa風向平均 [度]	171	245	256	267	283	287	298	52	78	122
925hPa風向標準偏差	5.7	14.0	14.1	24.2	25.0	38.9	32.3	70.2	44.3	42.5
925hPa風速平均 [m/s]	14.5	11.3	12.0	14.0	13.5	12.8	12.3	8.8	9.0	11.9
925hPa風速標準偏差	4.9	3.4	4.0	5.1	5.0	2.2	8.0	4.9	6.1	7.9
SO ₂ 濃度が0.1ppm以上の観測時間数 [hour]	32	238	349	301	233	58	88	174	106	88
SO ₂ 濃度が0.1ppm以上の割合 [%]	2.2	17.8	28.0	21.3	16.1	4.1	6.1	14.2	7.4	5.7
925hPa風向平均 [度]	178	253	265	271	279	293	331	17	70	121
925hPa風向標準偏差	38.0	21.8	25.0	28.2	25.2	36.5	65.1	73.1	51.4	51.3
925hPa風速平均 [m/s]	11.3	11.7	12.8	13.1	13.3	9.3	10.3	8.2	9.8	8.0
925hPa風速標準偏差	6.7	4.8	5.1	5.3	5.2	4.8	5.7	5.8	5.2	5.5

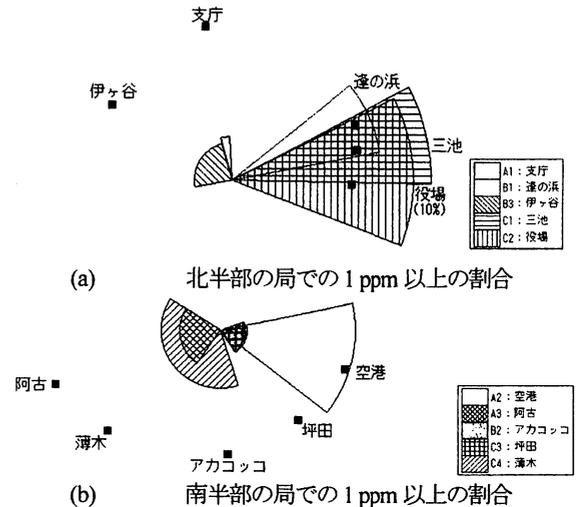


図5 2002年5月～2003年4月の八丈島925 hPa高層風と高濃度事象の対応。

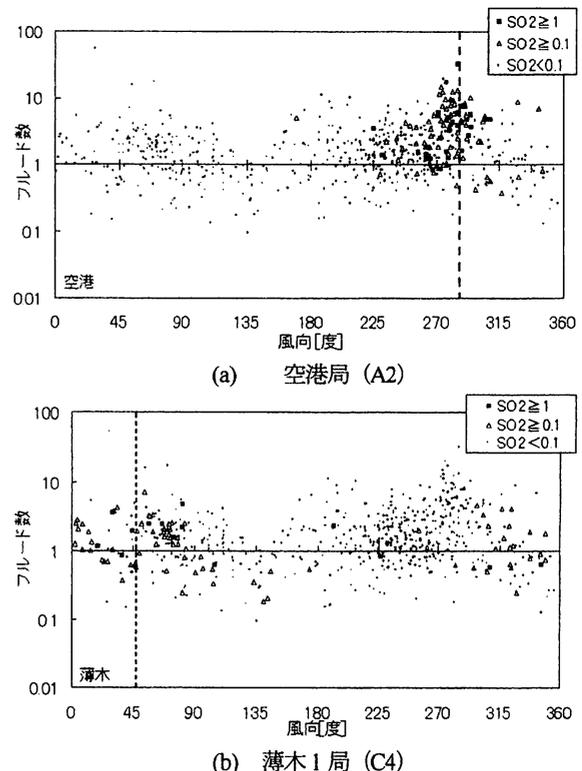


図6 2002年5月～2003年4月の高層風観測時のSO₂濃度に対する八丈島925 hPa高層風の風向とフルード数の散布図。

たときの風向の標準偏差が70.3度と44.3度と東部の局に比べて2～3倍大きくなっており、4,5 m/s程度の風速でも高濃度事象が起きる場合がある。薄木1局 (C1) における高層風観測時のSO₂濃度に対する高層風の風向とフルード数の散布図を図6(b)に示す。火口の方位にあたる45度以外に315度にも多くのデータ点が見られる。なお、2002年5月から2003年4月までの間の薄木1局における最高値は3.36 ppmで、東部に位置する三池局における最高値の半分程度の濃度である。

風向の標準偏差がこのように大きくなる原因を調べるために、薄木局と阿古局で1 ppm以上が記録されている50事例について、3時間毎の地上天気図から高濃度事象時の気圧配置を調べた。その結果、台風や発達した低気圧の中心が三宅島の南西～西に位置していた場合以外は、三宅島の北を移動する高気圧が次の三つのパターンで関係することがわかった。

1. 単独あるいは複数の高気圧が東進する過程でその中心付近が三宅島の北に位置し、その周りの風が観測局方向に吹く場合。
2. 前線を伴う低気圧が東に移動して三宅島の東～南に寒冷前線が位置し、後に続く高気圧が西に位置する場合。
3. 三宅島の東～南に停滞前線が位置し、北を高気圧が通過している場合。

それぞれのパターンの典型的な天気図を図7に示す。これらの気圧配置では、三宅島上空では等圧線にそって北東の風が吹きやすく、三宅島の南南東約110 kmに位置している八丈島上空とは風向が異なっている可能性がある。そこで、阿古局 (A3) 局で0.1 ppm以上となる62例について、阿古の地上風 (AMeDAS) と八丈島高層風を比較した。両者の風向には違いがみられ、高濃度となっているときにはAMeDASデータでは北～東よりの風の影響が多くみられた。しかし、風だけでは理解できない事例も少なくないため、更なる詳細な検討を行う必要がある。

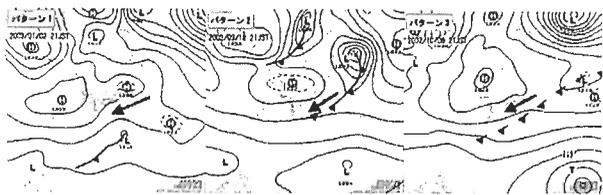


図7 南西部の局でSO₂濃度が高くなる気圧配置3パターンの典型例 (矢印は天気図から推測される三宅島周辺の風系)。

3) 火山ガスの植生への影響

三宅島2000年噴火前後の植生指数 (NDVI) 画像を図8に示す。図8(a)の1994年4月3日のJERS-1/OPSのデータによるOPS(NDVI)画像は、2000年の三宅島噴火前は島のほとんどが植物に覆われていたことを示している。黒く表示されている部分は、海や池などの水面や火口付近の裸地、南西部の溶岩流及び東側にある三宅島空港や道路などである。一方、図8(b)の2003

年4月7日のTerra/ASTERデータによるASTER(NDVI)画像の島の大局的な濃淡の分布をみると、島の東部と南西部では山麓まで暗い領域が広がっている。このNDVIが小さい領域は、SO₂平均濃度が高い火山ガス固定観測局の位置と一致しており、火山ガスによる植生へのダメージが大きい領域であることが示されている。また、支庁局 (A1) と伊ヶ谷局 (B3) の間に位置する北東部や、アカコッコ局 (B2) や坪田局 (C3) がある南東部は明るく表示されており、他の方向に比べると植物へのダメージが少なく、植生の量や活性度が高いことがわかる。なお、植物の葉の表面が降灰に覆われると植生指数が低下するが、2000年9月中旬以降の三宅島噴煙は白っぽい噴煙が主で降灰はほとんどみられないことや2003年4月5日に三宅島島内で降雨量88 mmが観測されていることから、ここで使用したASTERデータには植物表面の火山灰の影響はないと考えられる。

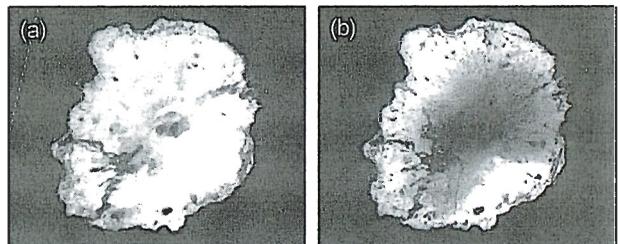


図8 2000年の三宅島噴火前後のNDVI画像
(a) 1994年4月3日 (b) 2003年4月7日

衛星画像に示される植物の状態は積算的な火山ガスの影響を反映しているので、火山ガス観測局におけるSO₂濃度の2002年5月～2003年4月の年平均値を求めた(表2)。環境基準では1時間値が0.1 ppmを超えないことと定められていることから考えると、年平均値が0.1 ppmを超えている逢ノ浜局 (B1)、三池局 (C1)、役場局 (C2)、空港局 (A2)、薄木1局 (C4) は非常に高濃度のSO₂が長時間観測される地域である。一方、環境基準の長期的評価で基準値として示されている年平均値0.04 ppm以下を満たしている支庁局 (B1) と坪田局 (C3) は火山ガスの影響をあまり受けない地域といえる。

表2 2002年5月～2003年4月のSO₂濃度年平均値。

局名	支庁	逢の浜	三池	村役場	空港	坪田	アカコッコ	薄木	阿古	伊ヶ谷
SO ₂ [ppm]	11	143	279	280	166	17	29	120	46	40

2000年の三宅島噴火前後の植生分布の変化から火山ガス環境を評価するために、図8に示したOPS (NDVI)画像とASTER (NDVI)を利用した。これらは異なる衛星/センサのデータなので、海岸線や溶岩流など8点の基準点を指定して位置合わせを行った。その後、OPS(NDVI)画像とASTER(NDVI)画像の差をdNDVIとして計算した。火山ガスの影響がない部分の植生指数が

OPS(NDVI)とASTER(NDVI)とで等しいと仮定すると、火山ガスによる植物へのダメージが大きくて、ASTER画像で植生指数がより小さくなるほどdNDVIが大きくなる。

dNDVI値から火山ガスの危険が非常に高い地域を赤、高い地域をオレンジ、あまり高くない地域を藤色、危険はほとんどない、もしくはもとのNDVIが小さかった領域を青となるように色分けした。水面や道路などの領域のマスク画像はJERS-1/OPSの近赤外バンドを用いて作成した。このようにして作成した火山ガス環境の評価結果、言い換えるとハザードマップを白黒化したものを図9に示す。カラーの原画はホームページ[10]に掲載している。火口や溶岩流、空港などのマスクは不完全であるが、識別できる。山頂部の北西部付近のマスク領域は、OPS画像で陰の領域である。島の東部と南西部では、非常に危険なことを示す赤色の領域が海岸部まで達しており、高濃度SO₂の発生割合(表1)やSO₂濃度の年平均値(表2)が高い局の位置とよく対応している。一方、島の北西部と南東部では、危険性の非常に高い領域と高い領域(カラー原画で赤やオレンジの領域)は火口から標高の高い位置までしか見られない。図4bの風配図に示したように、一年を通して北西と南東の風が吹くことは非常に少ないためであると考え。また、ハザードマップによって、OPS(NDVI)画像だけからの判断では火山ガスの影響が比較的小さいと思われたアカコッコ局の周辺も火山ガスの影響を受けていたことがわかる。このように、地球観測衛星画像を用いて火山ガスハザードマップを作成することにより、島内全域の火山ガス環境を明示することができる。ただし、NDVI画像を用いて作成したハザードマップは、もともとNDVIが小さかった領域については周辺の状況(山腹側の植生が十分にあった領域)から外挿推測して判断する必要がある。また、NDVI画像は積算的な火山ガス環境を表していることに注意しなくてはならない。

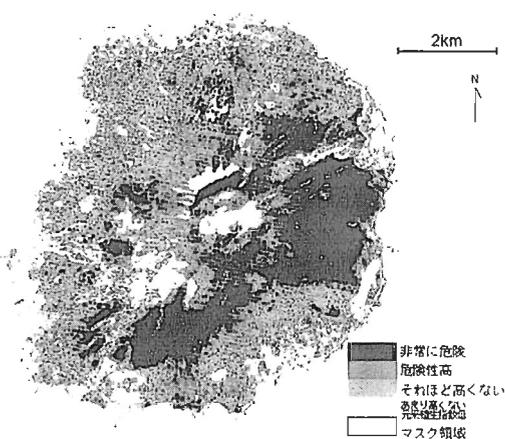


図9 植生指数差画像による火山ガスハザードマップ。

4. 教材化

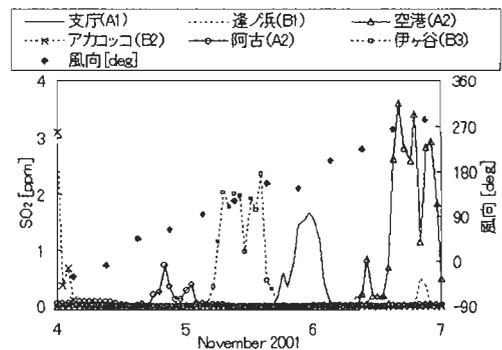
三宅島島内の火山ガス環境は気象に依存しており、島内における高濃度SO₂事象発生の主因は強風による吹き降ろしである。

しかしながら、地域によっては八丈島 925 hPa 高層風だけでは高濃度の発生を説明できない事例がみられる。教材としては、例外が少なく、典型的なパターンを示す事例を選定する必要がある。以下では中学校理科と高等学校地学における教材化を検討する。

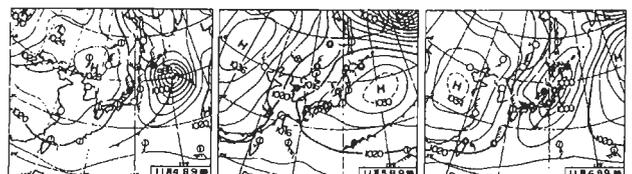
1) 中学校理科

平成20年告示の中学校学習指導要領解説理科編[7]「(4) 気象とその変化」では、「ウ 日本の気象」が新設され、前回の改定で高等学校に移行された「(ア) 日本の天気の特徴」の学習が中学校に戻り、「(イ) 大気の動きと海洋の影響」も学習することになっている。また、従来どおり、「イ 天気の変化」の「(イ) 前線の通過と天気の変化」も学習する。これらの学習において、あるいは、気象の学習を活用する教材として以下の2例を検討する。

一つ目は、春や秋の特徴である移動性の高気圧と低気圧が交互に東へと移動していく場合である。前線の通過や後に続く移動性高気圧の東進に伴う風向変化によって、高濃度発生地域が移り変わっていく。具体例として2001年11月4日～6日のSO₂濃度と925 hPa 八丈島高層風の風向の時間変化を図10(a)に示す。◇が風向の変化を示している。北風から東風、南風、西風と反時計回りに風向が変化し、それに対応して風下にあたるアカコッコ局(B2)、阿古局(A3)、伊ヶ谷局(B3)、支庁局(A1)、空港局(A2)へと時計回りでSO₂濃度のピークが観測されている。この風向変化と高濃度発生局の移り変わりは図10(b)の3日間の天気図から理解できる。見方を変えると、気象の学習の応用として、気圧配置の変化から高濃度の発生地域を予測することができることになる。



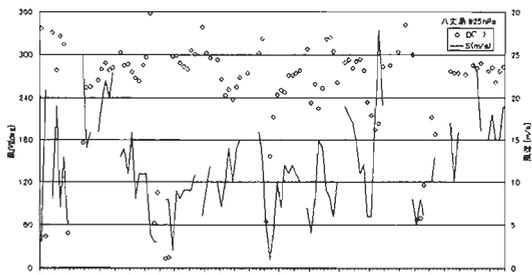
(a) SO₂濃度と八丈島 925 hPa 高層風向の時間変化



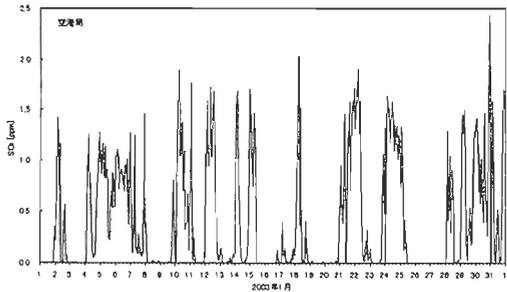
(b) 地上天気図

図10 2001年11月4日～6日のSO₂濃度と気象状況

二つ目は、冬季の特徴である北西の季節風による高濃度事象である。2003年1月の1ヶ月間の八丈島925 hPa高層風の風向と風速の時間変化を図11(a)に示す。西よりの風が支配的で風が強いことが多いことがわかる。この期間内の空港局(A2)におけるSO₂濃度の時間変化を図11(b)に示す。頻繁に高濃度となっている。また、高濃度の継続時間が長いことがわかる。ここでは他の季節のSO₂濃度変化の図は示さないが、高濃度事象の継続時間が長いことは冬季にのみ見られる現象である。このことは西高東低の冬型の気圧配置が安定している間は風向の変化が小さく、強風が続くという冬季の特徴から説明でき、高層風(図11(a)からも明らかである。



(a) 2003年1月の八丈島925 hPa高層風の時間変化



(b) 空港局(A2)におけるSO₂濃度の時間変化

図11 2003年1月の高層風とSO₂濃度

2) 高等学校理科

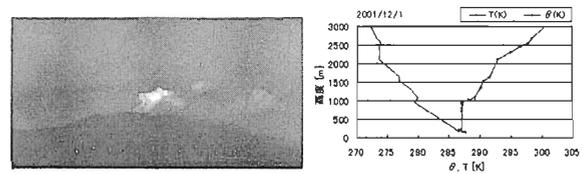
高等学校学習指導要領[8]が平成21年に告示された。今回の改訂では、探究的な学習が重視されている。理科については、中学校において移行措置として理科の内容を前倒して実施することとしたことに対応して、平成24年4月1日の入学生から年次進行により先行して実施することになっている。したがって、平成23年4月1日の入学生までは現行の学習指導要領が適応されることになるため、先に提案した中学校理科の教材は、高等学校の「理科総合B」や「地学I」においても利用可能である。加えて、探究活動では、例えば図4に示した風系の特徴などから夏季に高濃度事象が多く発生しそうな地域を予測したり、台風による影響などを予測したりして、島内のSO₂濃度の時間変化のグラフ[11]や天気図[12]、高層風・地上風[13]、気象衛星画像[14]などのデータを情報ネットワークなどを収集して分析・解釈し、自ら設定した仮説・推論を立証するといった活動が考えられる。

新学習指導要領では、「地学基礎」の「(2)変動する地球」に「エ 地球の環境」が新設されている。ここでは「(イ)日本の自然環境について」の「恩恵や災害」において自然災害の予測や防災にも触れることとなっている。ここでの教材化を検討する。なお、「オ 変動する地球に関する探究活動」でも利用可能である。

三宅島のような活発に活動する火山から放出される高温型火山ガスは噴煙と挙動をともにするとみなすことができる[1]。したがって、噴煙を大気の運動を示すトレーサとして、噴煙の挙動から火山ガスの挙動を推測したり、地表面における高濃度SO₂を予測したりできることになる。

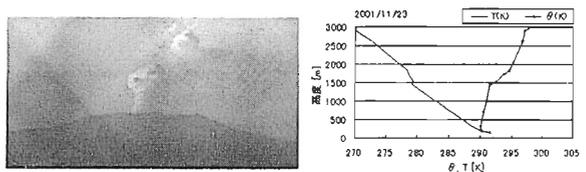
強風時の典型例として2001年12月1日の御蔵カメラ画像と気温と温位の鉛直プロファイルを図12(a)と(b)に示す。3, 9, 15, 21時の風速は16, 9, 8, 8 m/sであった。9時の大気の状態は1000 m付近の0.6 Kの逆転層まで中立で、高度196~800 mのフルード数は1.9である。御蔵カメラ画像に示されるように吹き降ろしが起きており、この日は空港局において1日中、1 ppmを超える高濃度のSO₂が観測された。ここで、御蔵島カメラ画像は、東京大学地震研究所によって三宅島の南南東約20 kmにある御蔵島に設置された自動噴煙映像システムにより撮影された画像である。画像の右方向は空港局(A2)に、左方向は阿古局(A3)周辺に対応する。

弱風時の典型例として2001年11月23日の御蔵カメラ画像と気温と温位の鉛直プロファイルを図13(a)と(b)に示す。3, 15, 21時の風速は3, 2, 3 m/sであった(9時は欠測)。9時の大気の状態は1500 m付近の0.3 Kの逆転層まで弱安定で、15時の風データに基づく192~800 mのフルード数は0.5である。フルード数からも予測されるように、御蔵カメラの噴煙は吹き降ろすことなく上昇している。三宅島島内のこの日の1時~17時のSO₂濃度は、すべての局で0.1 ppm未満であった。弱風時には高濃度SO₂が島内の地表面に直接もたらされることなく、火山ガスは噴煙とともに上昇していることがわかる。



(a) 10:36の御蔵島カメラ映像 (b)9時の八丈島高層風による気温と温位プロファイル

図12 強風時の典型例: 2001年12月1日



(a) 15:37の御蔵島カメラ映像 (b)9時の八丈島高層風による気温と温位プロファイル

図13 弱風の典型例: 2001年11月23日

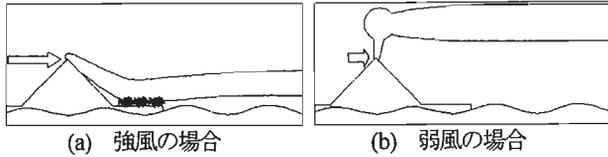


図14 火山噴煙・ガスの挙動の概念図

以上のことから、強風時と弱風時における噴煙・火山ガスの挙動を図14に示す概念図のようにまとめることができ、噴煙の挙動を観測することによって地表面における高濃度 SO₂ を予測できることを示すことができる。

防災教育のための教材として、3節3)で述べた内容を「地学基礎」や「地学」の探究活動で利用することも可能であろう。図9に示したハザードマップのカラー版は、三宅村によって作成された火山ガスハザードマップの基礎資料として、実際に利用されたものである。

3) 環境教育

火山ガス放出量の減少によって植生が回復してきている様子は衛星画像でもよく捉えられている。2003年4月7日と2007年5月11日のTerra/ASTER データから計算したNDVI 画像から火山ガス環境の変化を調べる教材を検討する。2007年5月11日のASTER (NDVI) 画像を図15に示す。図8(b)に示す2003年4月7日ASTER (NDVI) 画像との差画像を図16に示す。白く表されているほど植生の回復が大きく、黒で示されている領域は植生の変化が無い植生が減少している領域である。坪田高濃度地区内の美茂井局(D1)、逢ノ浜局(B1)(北東部)や薄木1局(C4)、薄木2局(D3)、阿古局(A3)(南西部)においても、山麓部付近まで植生が回復してきていることがわかる。一方、火口東に位置する三池局(C1)と役場局(C2)の方角では、植生の回復が遅れていることがわかる。ASTERによる観測が行われた頃の火山ガス環境を知るために、衛星データ取得月までの1年間のSO₂濃度の1時間値から年平均値と0.1ppmおよび2ppmを超え

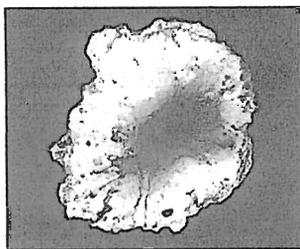


図15 2007年5月11日のASTER (NDVI) 画像

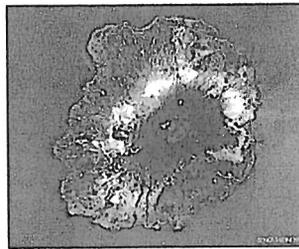


図16 植生の経年変化

る頻度を調べた結果を表3に示す。0.1ppm を越える高濃度の発生頻度は5局で上昇しており、一様に低下しているとは言えないが、年平均値と2ppmを超えるような超高濃度の発生頻度は減少している。植生の回復は2ppmを超えるような超高濃度の発生頻度の低下によると考えられる。なお、2005年5月と2008年5月に現地植生調査を行い、衛星画像に示される植生分布との整合性を確認している。現地撮影した植生の可視・近赤外画像の一部をホームページ[10]に公開している。これらの結果や図3に示した月平均濃度の経年変化のグラフなどから、火口東側の植生の回復が遅れている原因を探究することが考えられる。

5. おわりに

本稿では三宅島島内の火山ガス環境について概括し、新学習指導要領の改訂の趣旨を踏まえた教材開発として、研究成果を用いた中学校理科や高等学校地学のための教材化を検討した。解析結果はホームページ[10,11]で公開されており、素材としての利用はすでに可能である。今後は教材化を進めて教材パッケージを公開できるようにしていきたい。

熊本には三宅島と同様に活発に活動している阿蘇火山がある。小・中学校理科の教材としては、地域素材の活用が特に重要である。2009年5月から阿蘇草千里ヶ浜にある阿蘇火山博物館にネットワークカメラを設置して阿蘇火山の映像観測を行っている。今後、画像の蓄積と研究を進めて教材化を行う予定である。なお、地域素材の提供を目的として、ホームページ[12]において7:00~18:00の1時間毎の画像のデータベース化と公開を始めている。

謝辞

三宅島山麓の火山ガス固定観測局データをご提供いただきました東京都と三宅村、御蔵島カメラ画像をご提供いただきました東京工業大学火山流体研究センターの寺田暁彦博士に心より感謝いたします。鹿児島大学/熊本大学噴煙研究グループメンバーのご協力や議論に感謝いたします。三宅島島内火山ガス環境に関する研究の一部は文部科学省科学研究補助金若手(B)18710152 から助成をうけて行いました。阿蘇火山映像観測は、熊本大学・阿蘇火山博物館・包括的連携協定事業の一環として行っています。阿蘇火山博物館のご協力に感謝いたします。阿蘇火山観測カメラの設置・運用は文部科学省科学研究補助金若手(B)21700791 の助成を受けて行っています。

参考文献

- 1) 三宅島火山ガス放出量: http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/320_Miyakejima/320_So2emission.htm
- 2) N. Iino, K. Kinoshita, M. Koyamada, C. Kanagaki and A. Terada: Analysis of high volcanic gas concentrations at the

表3 ASTERによる観測が行われた頃の三宅島火山ガス環境

	SO ₂	A1	B1	C1	C2	A2	C3	B2	C4	A3	B3
0205	年平均[ppm]	0.01	0.14	0.28	0.28	0.17	0.02	0.03	0.12	0.05	0.04
	>0.1ppm[局]	2.0	18.3	29.8	23.4	17.4	2.9	5.7	15.9	7.9	6.0
0304	>2ppm[局]	0.0	1.8	3.1	3.2	1.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.2
0606	年平均[ppm]	0.01	0.09	0.17	0.22	0.15	0.02	0.02	0.07	0.05	0.03
	>0.1ppm[局]	1.8	17.3	28.2	28.0	20.6	3.8	3.5	13.9	8.8	4.9
0705	>2ppm[局]	0.0	0.3	1.1	1.8	0.9	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0

- foot of Miyakejima volcano, Japan, J. Natural Disaster Science 25, pp.85-91, 2004.
- 3) 飯野直子・木下紀正・矢野利明：三宅島における高濃度火山ガス事象の地域特性, 自然災害科学, Vol.23, No.4, pp.505-520, 2005.
 - 4) 飯野直子・芝貴章・矢野利明・木下紀正：植生指数画像による三宅島島内火山ガスハザードマップの試作, 日本リモートセンシング学会第36回学術講演会論文集, pp.33-34, 2004.
 - 5) 飯野直子・金柿主税：2007年のNDVI画像を用いた三宅島火山ガスハザードマッピング, 第9回大気環境学会九州支部研究発表会講演要旨集, pp.17-18, 2009.
 - 6) 文部科学省(2008)：小学校学習指導要領解説理科編, 大日本図書, 105.
 - 7) 文部科学省(2008)：中学校学習指導要領解説理科編, 大日本図書, 149.
 - 8) 高等学校学習指導要領解説理科編(2009)：
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2009/08/05/1282000_3_1.pdf
 - 9) 内田孝紀・大屋裕二：パッシブ粒子追跡方による三宅島火山ガス挙動の可視化, 可視化情報学会論文集 23, pp.58-65, 2003.
 - 10) 三宅島高濃度火山ガスに関する研究：
<http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/volc/miyakejima/>
 - 11) NOAA/AVHRRによる三宅島の噴煙：
<http://arist.edu.kagoshima-u.ac.jp/miyake/index.htm>
 - 12) calderaeye 阿蘇カルデラ火山観測カメラ：
<http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/volc/aso/>